

①⑨ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ Patentschrift  
⑩ DE 42 31 578 C 2

⑳ Aktenzeichen: P 42 31 578.6-52  
㉑ Anmeldetag: 21. 9. 92  
㉒ Offenlegungstag: 24. 3. 94  
㉓ Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 29. 6. 95

⑤① Int. Cl. 6:  
G 01 B 11/16  
G 01 B 9/02  
G 01 M 17/02  
G 01 N 21/45  
G 01 M 5/00  
G 01 M 11/08

I D S

16

DE 42 31 578 C 2

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

㉗ Patentinhaber:  
Nova C.O.R.D. AG, Vaduz, LI  
  
㉘ Vertreter:  
von Fünér, A., Dipl.-Chem. Dr.rer.nat.; Ebbinghaus,  
D., Dipl.-Ing.; Finck, K., Dipl.-Ing. Dr.-Ing.,  
Pat.-Anwälte, 81541 München

㉙ Erfinder:  
Rottenkolber, Hans, Dr., 8201 Amerang, DE

㉚ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit  
in Betracht gezogene Druckschriften:

DE 40 36 120 A1  
DE 40 13 309 A1  
DE 36 24 589 A1  
US 46 60 978  
EP 03 19 923 A2

Grimschl-Lehrbuch der Physik, Bd. III-Optik, 15.  
Aufl., BSB B.G.Teubner Verlagsgesell- schaft,  
Leipzig, 1969, S. 140-142;  
OSTEN, Wolfgang: Digitale Verarbeitung und  
Auswertung von Interferenzbildern, Akademie-  
Verlag, Berlin 1991, S. 61-66;  
tm-Technisches Messen, 58, 1991, S. 228-234;

㉛ Verfahren zur Ermittlung von Verformungen an einem Prüfobjekt mit diffus streuender Oberfläche,  
insbesondere an Reifen, sowie Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens

DE 42 31 578 C 2

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Ermittlung von Verformungen an einem Prüfobjekt mit diffus streuender Oberfläche, insbesondere an Reifen nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 sowie eine Vorrichtung zur Durchführung dieses Verfahrens nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 7.

Ein gattungsgemäßes Verfahren sowie eine gattungsgemäße Vorrichtung sind aus DE 40 36 120 A1 bekannt. Bei dem aus dieser Druckschrift bekannten Verfahren wird das Prüfobjekt ganzflächig sowohl mit grünem als auch mit rotem Laserlicht in eine erste, grüne Teilstrahlung und eine zweite, rote Teilstrahlung geteilt. Als Sensor ist eine Farbvideokamera erforderlich, deren Rotanteil eine Information in einer Richtung und deren Grünanteil eine Information in einer darauf senkrecht stehenden Richtung liefert. Die Farbvideokamera registriert Bilder des Prüfobjekts in verschiedenen Zuständen, die in einem Speicher gespeichert und auf verschiedene Arten voneinander subtrahiert werden.

Die zwei verschiedenen Laser dienen bei dem bekannten Verfahren also zur Erfassung verschiedener Richtungen des Verformungsgradienten des Prüfobjekts. Es handelt sich praktisch um mehrere Geräte, wobei jedes Gerät zur Bestimmung einer einzigen Richtung des Verformungsgradienten dient. Jedes dieser Geräte enthält eine einzige kohärente Lichtquelle. Die Phasenschiebe- und die Shearingoptik wird von beiden Geräten benutzt.

Da die Laser bei dem bekannten Verfahren das Prüfobjekt jeweils ganzflächig bestrahlen müssen, sind Laser mit einer sehr hohen Gesamtleistung erforderlich. Solche Laser sind jedoch sehr teuer, so daß das bekannte Verfahren sehr aufwendig ist. Schließlich wird durch die zu verwendenden Laser die Betriebssicherheit eingeschränkt.

In "Digitale Verarbeitung und Auswertung von Interferenzbildern", Wolfgang Osten, Akademie-Verlag, 1991, Seiten 61 bis 66, ist beispielsweise beschrieben, wie aus mehreren phasenverschobenen Bildern mit Hilfe von Bildverarbeitungssystemen ein Modulo- $2\pi$ -Bild erzeugt werden kann.

Aus DE 40 13 309 A1 ist eine Modulo- $2\pi$ -Bildverarbeitung zur optischen Untersuchung von Prüflingen bekannt, bei dem der Prüfling ganzflächig mit einem Laser beleuchtet wird.

Aus DE 36 24 589 A1 ist ein Verfahren zur Ermittlung von Verformungen an Reifen bekannt, bei dem der Reifen ohne Felge in einer Druckkammer angeordnet ist, in der unterschiedliche Drücke eingestellt werden können. Von der mit einem Laser beleuchtete Reifenoberfläche wird bei zwei unterschiedlichen Drücken ein holographisches Interferenzbild erzeugt, welches auf photothermoplastisches Filmmaterial in einer speziellen Kamera aufgezeichnet wird.

Um die Schwingungsempfindlichkeit der Vorrichtung auszuschalten, wird der Reifen mit energiereichen, sehr kurzen Laserimpulsen beleuchtet.

Das bekannte Verfahren ist aufgrund der Notwendigkeit eines gepulsten Lasers sehr aufwendig. Des weiteren liegt das Prüfergebnis als Interferogramm vor, dessen Auswertung nur von geschultem Bedienungspersonal vorgenommen werden kann. Im Falle der Überprüfung von Reifen auf Wiederverwendbarkeit (Runderneuerung) ist der Reifen zunächst immer auf Felge montiert. Da bei dem bekannten Verfahren die Innenfläche des Reifens geprüft wird, muß der Reifen von der Felge

abmontiert werden. Der Arbeitsaufwand ist somit sehr hoch.

Aus der Veröffentlichung "Kohärent-optische Verfahren in der Oberflächenmeßtechnik", H. J. Tiziani in — Technisches Messen, 58, 1991, Seite 228 bis 234, ist bekannt, zur Untersuchung von Verschiebungen in der Objektebene einen Prüfling aus zwei unterschiedlichen Richtungen mit kohärentem Licht zu beleuchten. Das von der Objektoberfläche zurückgestreute Licht wird über ein Objektiv in einer CCD-Kamera abgebildet. Dem vom Objekt zurückgestreuten Licht wird eine kohärente Referenzwelle überlagert, welche in einzelnen Schritten um  $\pi/2$  verschoben werden kann. In der Bildebene entsteht ein Specklemuster, welches in einem Rechner weiterverarbeitet wird. Das Verfahren arbeitet mit kleinen Aperturen und benötigt deshalb eine leistungsstarke Lichtquelle. Die überlagerte Referenzwelle setzt eine erschütterungsfreie Umgebung voraus, weshalb das Verfahren sich in einer typischen Industrieumgebung, wie sie beispielsweise zur Prüfung von Reifen gegeben ist, nicht eignet.

Aus US 46 60 978 ist ein Meßkopf bekannt, welcher zur Vermessung von vorzugsweise optischen Komponenten dient. Dabei wird gerichtetes Licht verwendet; die Meßgröße ist die Abweichung der Wellenfront von einem Sollwert eines Prüfobjektes.

Der Meßkopf ist als Michelson-Interferometer ausgebildet, in welchem die ankommende Wellenfront durch einen Strahlteiler in zwei Teilwellen aufgeteilt wird. Die beiden Teilwellen werden an zwei Spiegeln reflektiert und an dem Strahlteiler wieder zusammengeführt. An der Austrittsseite des Michelson-Interferometers ist ein Sensor-Array angeordnet. Durch minimales Verkippen eines Spiegels mittels eines Piezo-Elements wird eine Teilwelle verkippt; man erhält also zwei gegeneinander verschobene Teilwellen, welche miteinander interferieren können ("Shearing-Interferometer"). Der zweite Spiegel wird in Richtung der optischen Achse in Schritten von  $\pi/2$  verschoben. Die von dem Sensor-Array aufgenommenen Signale werden in einem Rechner weiterverarbeitet.

Der bekannte Meßkopf arbeitet mit gerichtetem Licht ohne Abbildungsobjektiv zur Abbildung eines Prüfkörpers. Wegen der fehlenden Apertur eines Objektives ist das Speckle-Prinzip nicht wirksam.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein einfaches Verfahren sowie eine einfache Vorrichtung zu schaffen, mit denen Verformungen an einem Prüfobjekt mit diffus streuender Oberfläche zuverlässig ermittelt werden können.

Ausgehend von dem gattungsgemäßen Stand der Technik wird diese Aufgabe durch die kennzeichnenden Merkmale der Patentansprüche 1 bzw. 7 gelöst. Vorteilhafte Ausführungsarten des erfindungsgemäßen Verfahrens sind Gegenstand der Patentansprüche 2 bis 6. Vorteilhafte Ausgestaltungen der Vorrichtung nach Anspruch 7 sind Gegenstand der Patentansprüche 8 bis 13.

Durch die Weiterverarbeitung der digitalisierten Signale zu einem Modulo- $2\pi$ -Bild ist es in überraschender Weise möglich, mehrere Laserdioden zu verwenden, die jeweils einen Leuchtfleck auf dem Prüfobjekt erzeugen. Laserdioden sind technisch sehr einfach und haben einen hohen Wirkungsgrad, so daß es möglich ist, mit relativ wenig Aufwand eine ausreichende Lichtgesamtleistung zu erhalten.

Jede Laserdiode beleuchtet einen Teilbereich des Prüfobjekts, so daß es Randzonen gibt, die einander überlappen. Aufgrund der sich überlappenden Bereiche

wird das Gesamtprüfobjekt mit inkohärenter Strahlung beleuchtet, obwohl das Licht der einzelnen Laserdioden kohärent ist. Die aus Teilflächen zusammengesetzte Gesamtfläche wird dem elektronischen Bildsensordsystem zugeführt und als Ganzes zu einem Modulo- $2\pi$ -Bild weiterverarbeitet.

Bei dem Verfahren wird das Prüfobjekt mit mehreren Laserdioden bestrahlt und die vom Prüfobjekt zurückgestreute Strahlung in zwei Teilstrahlungen aufgeteilt. Die zwei Teilstrahlungen werden derart wieder zusammengeführt, daß die beiden Teilstrahlungen leicht verkippt sind (Shearing-Effekt). Die die Bildinformation tragenden Teilstrahlungen werden dem elektronischen Bildsensordsystem zugeführt. Dabei wird das Prüfobjekt durch die abbildende Komponente auf dem Bildsensor abgebildet. Die auf den Bildsensor auftreffende Strahlung wird nach einer A/D-Wandlung in digitale Signale umgewandelt. Die Oberfläche des Prüfobjektes hat zunächst den Zustand 1, nach einer aufgetragenen Verformung den Zustand 2. Die Aufzeichnung des Oberflächenzustandes 1 erfolgt derart, daß in einer ersten Bildfolge eine Teilstrahlung bezüglich der zweiten Teilstrahlung schrittweise phasenverschoben wird. Die Bildfolge wird typischerweise in dem temporären Speicher eines Rechners abgelegt. Von dem Oberflächenzustand 2 wird in derselben Weise eine zweite Bildfolge erzeugt. Die einzelnen Schritte der ersten und der zweiten Bildfolge werden in einem Rechner zu einem Modulo- $2\pi$ -Bild weiterverarbeitet.

Die eine Teilstrahlung kann in der ersten und in der zweiten Bildfolge typischerweise in vier Schritten um jeweils  $\pi/2$  oder in drei Schritten um jeweils  $2/3\pi$  gegen die andere Teilstrahlung phasenverschoben werden. Es sind auch eine andere Anzahl von Schritten möglich, wobei die Schrittweite multipliziert mit der Anzahl der Schritte jeweils  $2\pi$  ergeben muß.

Vorteilhafterweise werden die digitalen Signale der Schritte der ersten Bildfolge zu einem Modulo- $2\pi$ -Bild und die digitalen Signale der Schritte der zweiten Bildfolge zu einem weiteren Modulo- $2\pi$ -Bild verarbeitet und die Differenz beider Modulo- $2\pi$ -Bilder gebildet.

Es ist jedoch auch möglich, die Differenz zwischen den digitalen Signalen eines Schrittes der ersten Bildfolge mit den digitalen Signalen der entsprechenden Schritte der zweiten Bildfolge zu einem Modulo- $2\pi$ -Bild zu verarbeiten, wobei der Verfahrensablauf auch ein Vertauschen der ersten Bildfolge mit der zweiten Bildfolge zuläßt.

Durch die beschriebene Rechenprozedur ist es möglich, mit abbildenden Komponenten mit großen Aperturen (z. B. 1 : 1,4) und deshalb mit Laserdioden mit relativ geringer Leistung (z. B. 30 mW) zu arbeiten.

Wenn das Prüfobjekt ein auf einer Felge montierter Reifen ist, kann die Verformung zwischen erster und zweiter Bildfolge durch Änderung des Reifeninnendruckes herbeigeführt werden. Der Reifen kann auch zum Kriechen stimuliert werden, beispielsweise durch Walzen des Reifens. Ein nicht auf Felge montierter Reifen kann Druckunterschieden in seiner Umgebung ausgesetzt und dadurch eine Verformung herbeigeführt werden.

Das Ziel der aufzubringenden Verformung besteht immer darin, Schwachstellen dadurch zu erkennen, daß solche Stellen eine signifikant andere Verformung als die Umgebung aufweisen.

Das erfindungsgemäße Verfahren ist sehr einfach durchführbar und liefert ein hervorragendes Prüfergebnis, das in kürzester Zeit beispielsweise auf einem Bild-

schirm darstellbar ist und auch von wenig geschultem Bedienungspersonal interpretiert werden kann. Das Verfahren ermöglicht die Anzeige der Differenz der Verformung zweier benachbarter Punkte und damit näherungsweise der im Maschinenbau wesentlichen mechanischen Spannung. Darüber hinaus ist das erfindungsgemäße Verfahren in normaler Industrieumgebung durchführbar. Es ist in aller Regel nicht erforderlich, die Prüfung in besonderen erschütterungsfreien Räumen durchzuführen. Schließlich ist das erfindungsgemäße Verfahren gegenüber den bisher bekannten Verfahren zur Ermittlung von Verformungen an einem Prüfobjekt mit diffus streuender Oberfläche extrem wirtschaftlich, da die Herstellkosten wegen der Verwendung von Serien-Kaufteilen niedrig gehalten werden können und die Betriebskosten vor allem durch den Wegfall von teurem Verbrauchsmaterial (Film, Laserrohre, etc.) ebenfalls niedrig sind.

Typischerweise bestehen die das Prüfobjekt abbildenden Komponenten aus einem Objektiv großer Öffnung, welches vor dem Bildsensordsystem angeordnet ist. Um eine Vignettierung durch die Zweistrahl-Interferometer-Anordnung bei größeren Bildwinkeln (z. B.  $> 30^\circ$ ) zu vermeiden, kann eine Negativ-Optik vor der Eintrittsseite des Interferometers zur Erweiterung des Bildwinkels angeordnet werden. An der Eintrittsseite des Interferometers kann auch eine ein Zwischenbild erzeugende Optik vorgesehen werden. Das Zwischenbild wird dann von einem zweiten Objektiv auf den Bildsensor abgebildet.

In den Strahlengang kann vor oder hinter dem Interferometer ein optisches Bandpaß- oder Kantenfilter eingesetzt werden, welches vorzugsweise die Wellenlänge des vom Objekt zurückgestreuten Lichtes durchläßt und das Umgebungslicht abblockt. Damit kann das erfindungsgemäße Verfahren auch in heller Umgebung durchgeführt werden.

Die Form des Leuchtflecks auf dem Prüfobjekt kann durch vor dem Laserdioden angeordnete Zylinderoptiken verändert werden. Jeder Leuchtfleck stellt in sich ein interferenzfähiges System dar. Die abbildenden Komponenten erzeugen auf dem Bildsensordsystem Abbildungen von mehreren Leuchtflecken. Damit können auch Prüfobjekte, deren Oberfläche nur wenig Licht zurückstreut, oder große Prüfobjekte untersucht werden. Dies ist beispielsweise besonders bei der Prüfung von schwarzen Reifenoberflächen vorteilhaft.

Das elektronische Bildsensordsystem ist vorteilhafterweise eine handelsübliche CCD-Kamera.

Ausführungsbeispiele der Erfindung werden nachstehend anhand von Zeichnungen näher erläutert. Es zeigt

Fig. 1 schematisch den Strahlengang bei einem Verfahren zur Ermittlung von Verformungen an einem Prüfobjekt mit diffus streuender Oberfläche,

Fig. 2 eine erste Ausführungsform eines Meßkopfs zur Durchführung des Verfahrens zur Ermittlung von Verformungen,

Fig. 3 eine zweite Ausführungsform eines Meßkopfs zur Durchführung des Verfahrens zur Ermittlung von Verformungen,

Fig. 4 eine Frontansicht eines Prüfstandes zur Prüfung von Reifen,

Fig. 5 eine geschnittene Seitenansicht des Prüfstandes von Fig. 4,

Fig. 6 ein Modulo- $2\pi$ -Bild eines schadhafte Reifens,

Fig. 7 ein Modulo- $2\pi$ -Bild eines fehlerfreien Reifens.

Bei dem Verfahren zur Ermittlung von Verformungen an einem Prüfobjekt 10 mit diffus streuender Oberflä-

che wird das Prüfobjekt 10 mit kohärentem Licht aus mehreren Laserdioden beleuchtet. Die Beleuchtung des Prüfobjektes 10 ist in Fig. 1 zur Vereinfachung anhand eines Lichtstrahls S dargestellt. Ebenfalls zur Vereinfachung ist die Oberfläche des Prüfobjektes 10 als Punkt P gekennzeichnet. Der Lichtstrahl S trifft in dem Punkt P auf dem Prüfobjekt 10 auf. Das vom Prüfobjekt 10 zurückgestreute Licht weist eine Speckle-Struktur auf. Zur Vereinfachung ist die Streulichtstrahlung in Fig. 1 anhand einer Streuwelle SW gezeigt. Die Streuwelle SW trifft auf eine strahlteilende Fläche 14 eines Strahlteilers 12 auf. Eine Teilstrahlung TS1 wird an der strahlteilenden Fläche 14 reflektiert und trifft auf einen ersten Planspiegel 16 auf. Der erste Planspiegel 16 ist senkrecht zu seiner Reflexionsfläche verschiebbar. Die Teilstrahlung TS1 wird an dem ersten Planspiegel 16 in sich reflektiert und geht durch die strahlteilende Fläche 14 hindurch.

Die strahlteilende Fläche 14 läßt eine zweite Teilstrahlung TS2 der Streuwelle SW durch, die auf einen zweiten Planspiegel 18 auftrifft. Der zweite Planspiegel 18 ist kippbar angeordnet, so daß die Neigung seiner Reflexionsfläche zur strahlteilenden Fläche 14 und zur Reflexionsfläche des ersten Planspiegels 16 verstellt werden kann. Die von dem zweiten Planspiegel 18 reflektierte Teilstrahlung TS2 wird an der strahlteilenden Fläche 14 in Richtung des Objektivs 20 reflektiert, auf das auch die Teilstrahlung TS1 auftrifft.

Die aus den beiden Planspiegeln und dem Strahlteiler bestehende Anordnung entspricht im wesentlichen einem Michelson-Interferometer, dessen einer Spiegel kippbar und dessen anderer Spiegel senkrecht zu seiner Reflexionsfläche verschiebbar ist. Beide Funktionen (Verkippen und verschieben) sind auch mit einem einzigen Planspiegel 16 oder 18 oder mit Hilfe des Strahlteilers 12 durchführbar.

Durch das Objektiv 20 wird der Punkt P, von dem die in zwei Teilstrahlungen TS1 und TS2 aufgeteilte Streuwelle SW ausgeht, nach Durchlaufen einer Apertur 22 auf Aufzeichnungselemente 24 eines elektronischen Bildsensorsystems abgebildet. Dabei hat die Apertur 22 vorteilhafterweise eine große Öffnung.

Durch entsprechende Neigung des zweiten Planspiegels 18 wird die Teilstrahlung TS2 an dem zweiten Planspiegel 18 und an der strahlteilenden Fläche 14 so reflektiert, daß sie nach ihrem Durchtritt durch das Objektiv 20 seitlich versetzt zur Teilstrahlung TS1 auf den Aufzeichnungselementen 24 auftrifft. In der Ebene der Aufzeichnungselemente 24 entstehen somit zwei seitlich versetzte Bilder des Prüfobjektes 10 (Shearing Effekt).

Aus der seitlichen Versetzung der Teilstrahlungen TS1 und TS2 folgt, daß das Bild des Punktes auf dem Prüfobjekt 10, welches durch die Teilstrahlung TS2 in der Ebene der Aufzeichnungselemente 24 gebildet wird, und das Bild eines benachbarten Punktes Q auf dem Prüfobjekt 10, welches durch die Teilstrahlung TS1 in der Ebene der Aufzeichnungselemente 24 gebildet wird, in der Ebene der Aufzeichnungselemente 24 überlagert werden und bei Verwendung von kohärentem Licht interferieren können (Shearing-Interferenz-Effekt).

Die von den Aufzeichnungselementen 24 empfangenen Signale werden in einem A/D-Wandler 26 digitalisiert. Die digitalen Signale werden einer Bildverarbeitungseinheit 28 zugeführt und dort zu Modulo-2 $\pi$ -Bildern verarbeitet.

Zur Durchführung des Verfahrens wird die Neigung des zweiten Planspiegels 18 bezüglich der teilenden Fläche 14 und des ersten Planspiegels 16 auf einen vorher-

bestimmten Wert eingestellt. Das Prüfobjekt 10 wird mit kohärentem Licht aus mehreren Laserdioden 36 beleuchtet.

Während des ersten, unverformten Oberflächenzustandes des Prüfobjektes 10 wird der erste Planspiegel 16 schrittweise viermal so verschoben, daß sich die Phase der von dem ersten Planspiegel 16 reflektierten Teilstrahlung TS1 jeweils um  $\pi/2$  verschiebt. In einer ersten Bildfolge werden auf die Aufzeichnungselemente 24 also vier, jeweils um  $\pi/2$  phasenverschobene Bilder des Prüfobjektes 10 abgebildet. Die von dem A/D-Wandler 26 der Bildverarbeitungseinheit 28 zugeführten digitalen Signale der Bilder der vorherbeschriebenen Schritte werden durch die Bildverarbeitungseinheit 28 zu einem Modulo-2 $\pi$ -Bild verarbeitet.

Anschließend wird das Prüfobjekt 10 verformt und damit ein zweiter, die Verformung wiedergebender Oberflächenzustand des Prüfobjektes 10 erzeugt. Die weitere vorgehensweise für eine zweite Bildfolge entspricht dem für den ersten Oberflächenzustand bereits beschriebenen Ablauf.

Anschließend wird die Differenz der der ersten und der zweiten Bildfolge entsprechenden Modulo-2 $\pi$ -Bilder gebildet. Das resultierende Modulo-2 $\pi$ -Bild ist die erste Form des Prüfergebnisses und wird auf einem an die Bildverarbeitungseinheit 28 angeschlossenen Monitor angezeigt. Das resultierende Modulo-2 $\pi$ -Bild kann dann in der Bildverarbeitungseinheit 28 mit bekannten Algorithmen zu anderen Darstellungsformen weiterverarbeitet werden.

In Fig. 2 ist die erste Ausführungsform eines Meßkopfes 29 zur Durchführung des beschriebenen Verfahrens gezeigt. Auf einer Grundplatte 30, auf der ein lösbarer Gehäusedeckel 32 befestigt ist, ist eine den Bildwinkel vergrößernde Optik 34 in der Strahlführung der Streuwellen SW angeordnet. Vor der Optik 34 ist ein Band- oder Hochpaßfilter (nicht gezeigt) angeordnet, der so ausgelegt ist, daß er kein die Prüfung störendes Umgebungslicht durchläßt.

An der Frontseite der Grundplatte 30 sind mehrere Laserdioden 36 in einstellbaren Fassungen zur Beleuchtung des Prüfobjektes angeordnet. Das von den Laserdioden 36 ausgestrahlte Licht ist transversal und longitudinal single-modig und hat typischerweise eine Wellenlänge zwischen 650 nm und 850 nm. Das Laserdioden-System kann auch als eine von dem Meßkopf 29 unabhängige Einheit ausgebildet sein.

In Einfallsrichtung der Streuwellen SW hinter der Optik 34 ist ein Michelson-Interferometer angeordnet. Das Michelson-Interferometer ist aus einem Strahlteiler 12 mit einer strahlteilenden Fläche 14 und den beiden Planspiegeln 16 und 18 aufgebaut. Die strahlteilende Fläche 14 ist unter 45° zur Einfallsrichtung der Streuwellen SW angeordnet. Die Planspiegel 16 und 18 sind so angeordnet, daß ihre Reflexionsflächen die Ebene der strahlteilenden Fläche 14 ca. unter 45° schneiden. Der erste Planspiegel 16 ist mit einem Piezoantrieb verbunden, durch den der erste Planspiegel 16 sehr genau senkrecht zu seiner Reflexionsfläche verschoben werden kann. Der zweite Planspiegel 18 ist auf einer Spiegelhalterung 40 befestigt, die mittels zweier Einstellschrauben 42 und 44 in zwei Achsen verkippt werden kann. Hierdurch ist es möglich, die Neigung des zweiten Planspiegels 18 bezüglich der strahlteilenden Fläche 14 zu verstellen. Beide Funktionen (Verkippen und Verschieben) sind auch mit einem einzigen Planspiegel 16 oder 18 oder mit Hilfe des Strahlteilers 12 durchführbar.

An der Austrittsseite des Michelson-Interferometers,

also gegenüber dem ersten Planspiegel 16, ist das Objektiv 20 einer CCD-Kamera 46 angeordnet.

Die strahlteilende Fläche 14 ist so ausgebildet, daß sie die auf sie auftreffende Streuwellen SW in die erste Teilstrahlung TS1 und in die zweite Teilstrahlung TS2 (Fig. 1) teilt. Die erste Teilstrahlung TS1 wird an der strahlteilenden Fläche 14 in Richtung des ersten Planspiegels 16 reflektiert. Die am ersten Planspiegel 16 reflektierte Teilstrahlung TS1 geht durch die strahlteilende Fläche 14 hindurch und trifft auf das Objektiv 20 der CCD-Kamera 46. Die zweite Teilstrahlung TS2 geht durch die strahlteilende Fläche 14 hindurch und trifft auf den zweiten Planspiegel 18 auf. Die von dem zweiten Planspiegel 18 reflektierte Teilstrahlung TS2 wird an der strahlteilenden Fläche 14 in Richtung des Objektivs 20 der CCD-Kamera 46 reflektiert.

Die CCD-Kamera 46 enthält neben dem Objektiv 20 die Aufzeichnungselemente 24 (CCD-Array). Die von den Aufzeichnungselementen 24 abgegebenen Analogsignale werden in einem A/D-Wandler 26 (Fig. 1) digitalisiert, der in einem Bildverarbeitungssystem eingebaut ist.

Bei der in Fig. 3 gezeigten zweiten Ausführungsform des Meßkopfes ist der Strahlteiler 48 eine planparallele, teildurchlässige Platte ausgebildet, welche unter ca. 45° zur Einfallsrichtung der Streuwellen SW angeordnet ist. Der Strahlteiler 48 ist bezüglich der einfallenden Strahlung SW verkippt. Hinter dem Strahlteiler 48 ist ebenfalls unter annähernd 45° zur Einfallsrichtung der Strahlung SW ein Planspiegel 50 angeordnet, der wie der erste Planspiegel 16 von Fig. 2 schrittweise senkrecht zu seiner Reflexionsebene verschiebbar ist. Beide Funktionen (Verkippen und verschieben) sind auch mit einem einzigen Planspiegel 50 oder mit Hilfe des Strahlteilers 48 durchführbar.

Der Strahlteiler 48 läßt eine Teilstrahlung TS1 der einfallenden Streuwellen SW hindurch. Die Teilstrahlung TS1 wird am Planspiegel 50 in Richtung des Objektivs 20 der CCD-Kamera 46 reflektiert, wobei sie den Strahlteiler 48 nochmals durchläuft. Die Teilstrahlung TS2 wird direkt vom Strahlteiler 48 an der dem Planspiegel 50 zugewandten Seite in Richtung des Objektivs 20 reflektiert.

Durch die Anordnung des verkippten Strahlteilers 48 und Planspiegels 50 ergibt sich derselbe Shearing-Effekt wie bei dem Meßkopf 29 der Fig. 2. Die zweite Ausführungsform des Meßkopfes hat gegenüber der ersten Ausführungsform den Vorteil, daß nur ein Planspiegel 50 neben dem Strahlteiler 48 erforderlich ist.

In den Fig. 4 und 5 ist ein Reifenprüfstand gezeigt, mit dem es möglich ist, Beschädigungen an einem Reifen durch das beschriebene Verfahren zu ermitteln. Der Reifenprüfstand weist ein Gestell 52 auf, auf dem eine horizontale Achse 54 in zwei Lagern 56 und 58 drehbar gelagert ist. An der Stirnseite der Achse 54 ist ein Flansch 60 angeordnet, an dem eine Felge 62 befestigt werden kann. Auf der Felge 62 ist ein Reifen 64 montiert.

Auf beiden Seiten des Reifens 64 sind an dem Gestell 52 jeweils zwei vertikale Stützen 66 angeordnet, auf denen Träger 67 gelagert sind. An diesen Trägern 67 sind die Meßköpfe 29 schwenkbar montiert. Die Position der Meßköpfe 29 ist derart, daß die optische Achse 68 etwa die Gürtelkante des Reifens 64 schneidet und der Winkel  $\alpha$  zwischen der optischen Achse 68 und der den Reifen tragenden Achse 54 etwa 35° ist.

Die abbildenden Komponenten (Optik 34 und Objektiv 20) sind so ausgelegt, daß der Meßkopf 29 einen Umfangsabschnitt des Reifens 64 mit einem Winkel  $\beta$  von etwa 45° erfaßt. Der gesamte Reifenumfang kann

also in acht Prüfzyklen erfaßt werden. Dazu wird der Reifen 64 um seine Achse 54 schrittweise gedreht.

Die Verformung des Reifens 64 in den einzelnen Prüfzyklen findet mit dem anhand von Fig. 1 beschriebenen Verfahren statt. Dabei wird die Verformung durch eine Änderung des Reifen-Innendrucks (Erhöhung oder Verminderung) herbeigeführt. Die Größe der Innendruckänderung hängt vom Reifentyp ab und kann fallweise eingestellt werden.

Weitere Meßköpfe können auch an anderer Stelle, z. B. im Wulstbereich, positioniert werden. Des weiteren sind Anordnungen möglich, den Reifen ohne Felge in einer Druckkammer zu prüfen. Typischerweise ist ein Meßkopf oder sind mehrere Meßköpfe dann im Bereich der Nabe angeordnet.

Die Fig. 6 und 7 zeigen resultierende Modulo-2 $\pi$ -Bilder eines 45°-Abschnittes eines Reifens. Die resultierenden Modulo-2 $\pi$ -Bilder wurden nach dem anhand der Fig. 1 beschriebenen Verfahren erstellt.

Fig. 7 zeigt einen fehlerfreien Reifenabschnitt. Dies ist aus dem konzentrischen Verlauf der Streifen S1 und S2 zu erkennen.

Fig. 6 zeigt einen fehlerhaften Reifenabschnitt. Dies ist deutlich an der Unterbrechung A des Streifens S2 zu erkennen. Die durch Änderung des Reifeninnendrucks hervorgerufene Verformung verläuft in dem Bereich der Unterbrechung A deutlich anders als im übrigen Reifenabschnitt. Die Unterbrechung A resultiert aus der unterschiedlichen Änderung der Verformung zweier benachbarter Punkte und indiziert somit näherungsweise einen kritischen Spannungsverlauf. Fig. 6 macht deutlich, daß eine schadhafte Stelle im Bereich der Gürtelkante auch von ungeschultem Bedienungspersonal genau zu erkennen ist.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Ermittlung von an einem Prüfobjekt mit diffus streuender Oberfläche, insbesondere an Reifen bei dem

- das Prüfobjekt mit kohärentem Licht beleuchtet wird,
- die vom Prüfobjekt zurückgestreute Strahlung in einem Zweistrahl-Interferometer in zwei Teilstrahlungen aufgeteilt wird,
- in dem Zweistrahl-Interferometer die eine der beiden Teilstrahlungen gegen die andere Teilstrahlung verkippt wird,
- in dem Zweistrahl-Interferometer eine der beiden Teilstrahlungen schrittweise phasenverschoben wird,
- die von dem Prüfobjekt zurückgestreute und in dem Zweistrahl-Interferometer in die zwei Teilstrahlungen aufgeteilte und wieder zusammengeführte Strahlung durch die Oberfläche des Prüfobjektes abbildende Komponenten mit großer Öffnung einem elektronischen Bildsensordsystem zugeführt wird und
- die von dem Bildsensordsystem abgegebenen Signale digitalisiert und in einem Bildverarbeitungssystem weiterverarbeitet werden

dadurch gekennzeichnet, daß

- das Prüfobjekt mit kohärentem Licht aus mehreren Laserdioden beleuchtet wird, die jeweils einen Leuchtfleck auf dem Prüfobjekt erzeugen, und daß
- die digitalisierten Signale in dem Bildverarbeitungssystem zu einem Modulo-2 $\pi$ -Bild wei-

terverarbeitet werden.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Prüfobjekt beleuchtende Licht eine Wellenlänge von 650 nm bis 850 nm hat.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die beiden Teilstrahlungen so verkippt werden, daß zwei seitlich versetzte Bilder des Prüfobjektes auf dem Bildsensordsystem entstehen, so daß zwei benachbarte Bildpunkte des Prüfobjektes, die um 10 bis 30 mm versetzt sind, überlagert werden.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die eine Teilstrahlung in vier Schritten um jeweils  $\pi/2$  gegen die andere Teilstrahlung phasenverschoben wird.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die eine Teilstrahlung in drei Schritten um jeweils  $2/3 \pi$  gegen die andere Teilstrahlung phasenverschoben wird.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche dadurch gekennzeichnet, daß die Öffnung der abbildenden Komponenten so groß ist, daß die entstehenden Speckle kleiner sind als die Größe eines einzelnen Aufzeichnungselementes des Bildsensordsystems.
7. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 6,
  - mit einer Beleuchtungseinheit zur Beleuchtung des Prüfobjektes (10) mit Laserlicht,
  - mit einem Meßkopf (29) bestehend aus
    - einem Zweistrahl-Interferometer mit einer Phasenverschiebeeinrichtung und einer Strahlverkippfungseinrichtung,
    - einem elektronischen Bildsensordsystem (CCD-Kamera 46) und
    - wenigstens einer die Oberfläche des Prüfobjektes (10) auf das elektronische Bildsensordsystem (CCD-Kamera 46) abbildenden Komponente (Optik 34; Objektiv 20), und
    - mit einem Bildverarbeitungssystem, bestehend aus einem A/D-Wandler (26) zur Digitalisierung der von dem elektronischen Bildsensordsystem (CCD-Kamera 46) abgegebenen Signale und einer Bildverarbeitungseinheit (28),
 dadurch gekennzeichnet,
  - daß die Beleuchtungseinheit mehreren Laserdioden (36) aufweist, die so angeordnet sind, daß mehrere Leuchtflecke auf dem Prüfobjekt erzeugt werden, und
  - die Bildverarbeitungseinheit (28) zur Modulo- $2\pi$ -Bildverrechnung der digitalisierten Signale ausgebildet ist.
8. Vorrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Beleuchtungseinheit eine eigenständige Einheit ist oder an dem Meßkopf (29) montiert ist und die Laserdioden (36) justierbar angeordnet sind und an der Lichtaustrittsseite jeder Laserdiode eine sphärische und/oder zylindrische Optik zur Gestaltung des Leuchtflecks auf dem Prüfobjekt (10) angebracht ist.
9. Vorrichtung nach Anspruch 7 oder 8, dadurch gekennzeichnet, daß das Zweistrahl-Interferometer als Luftspalt-Interferometer ausgebildet ist, das einen Strahlteiler (48), dessen strahlteilende Fläche unter etwa  $45^\circ$  gegen die Richtung der einfallenden Strahlung angeordnet ist, und einen in Strahlrichtung hinter dem Strahlteiler (48) ebenfalls unter

etwa  $45^\circ$  angeordneten Planspiegel (50) aufweist.

10. Vorrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß der Strahlteiler (48) verkipptbar und der Planspiegel (50) senkrecht zu seiner Reflexionsfläche verschiebbar ist.

11. Vorrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß der Planspiegel (50) verkipptbar und der Strahlteiler (48) senkrecht zu seiner Reflexionsfläche verschiebbar ist.

12. Vorrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß der Planspiegel (50) oder der Strahlteiler (48) sowohl verkipptbar als auch senkrecht zur Reflexionsfläche verschiebbar ist.

13. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß die abbildende Komponente von einer vor dem Zweistrahl-Interferometer angeordneten Objektiv (34) gebildet wird und ein reelles oder virtuelles Zwischenbild von dem Prüfobjekt (10) entwirft, welches dann von einem Objektiv (20) auf die Aufzeichnungselemente (24) des elektronischen Bildsensordsystems (46) abgebildet wird.

---

Hierzu 6 Seite(n) Zeichnungen

---

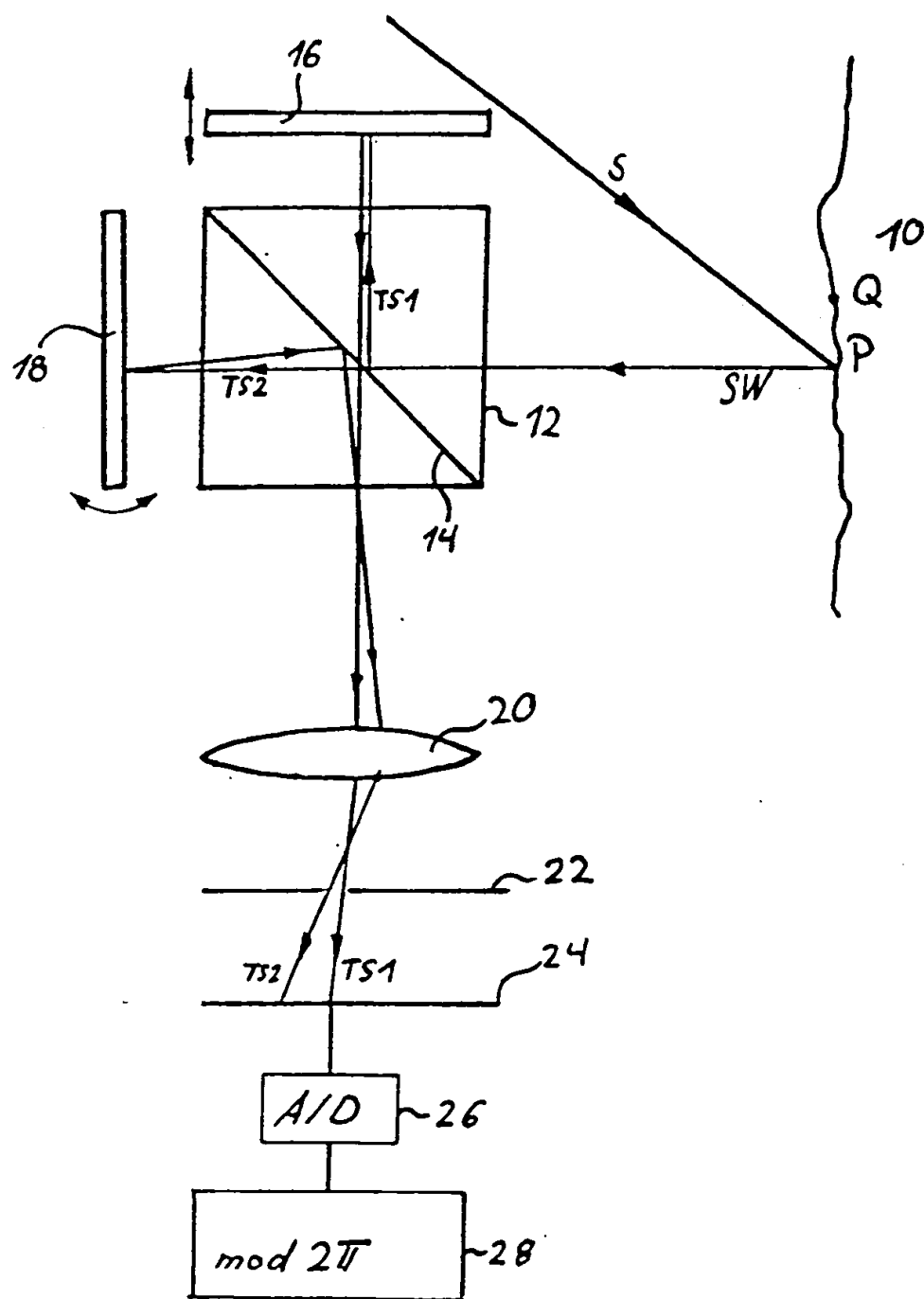


Fig. 1

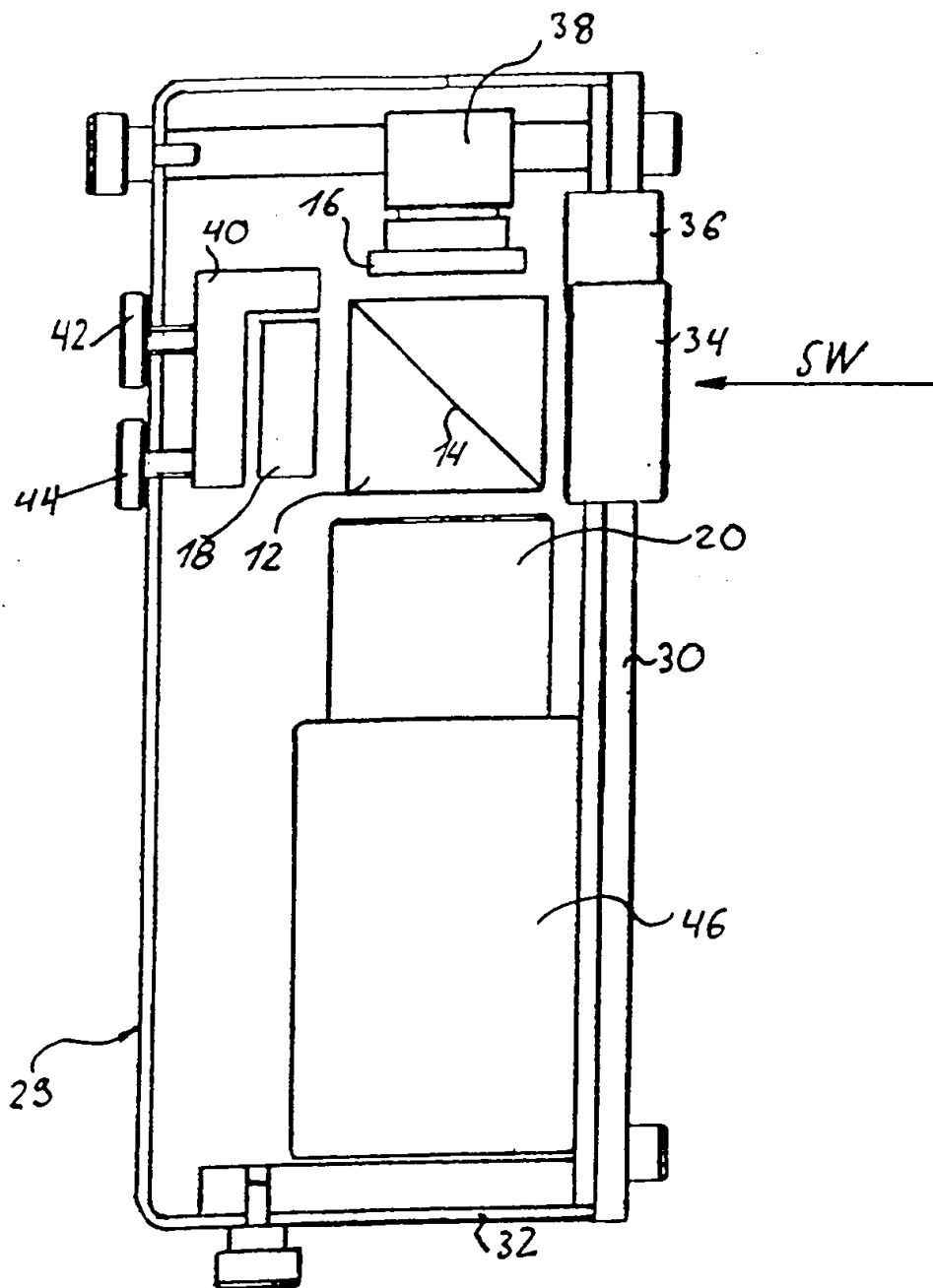


Fig. 2



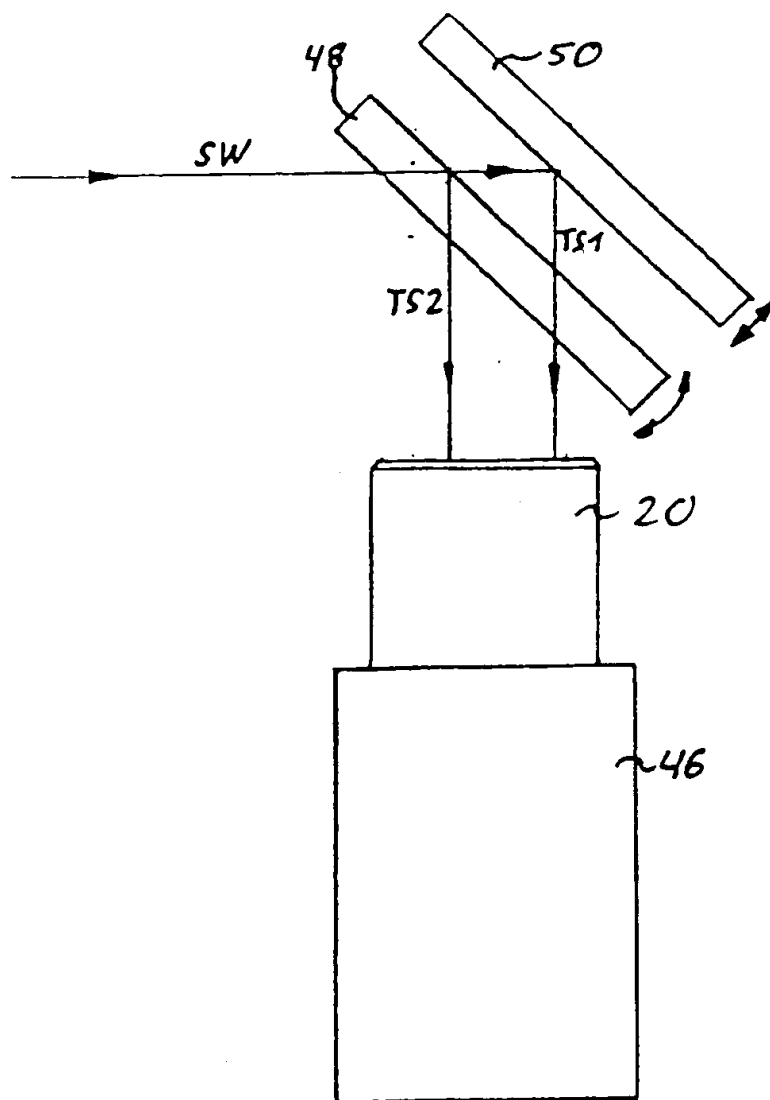


Fig. 3

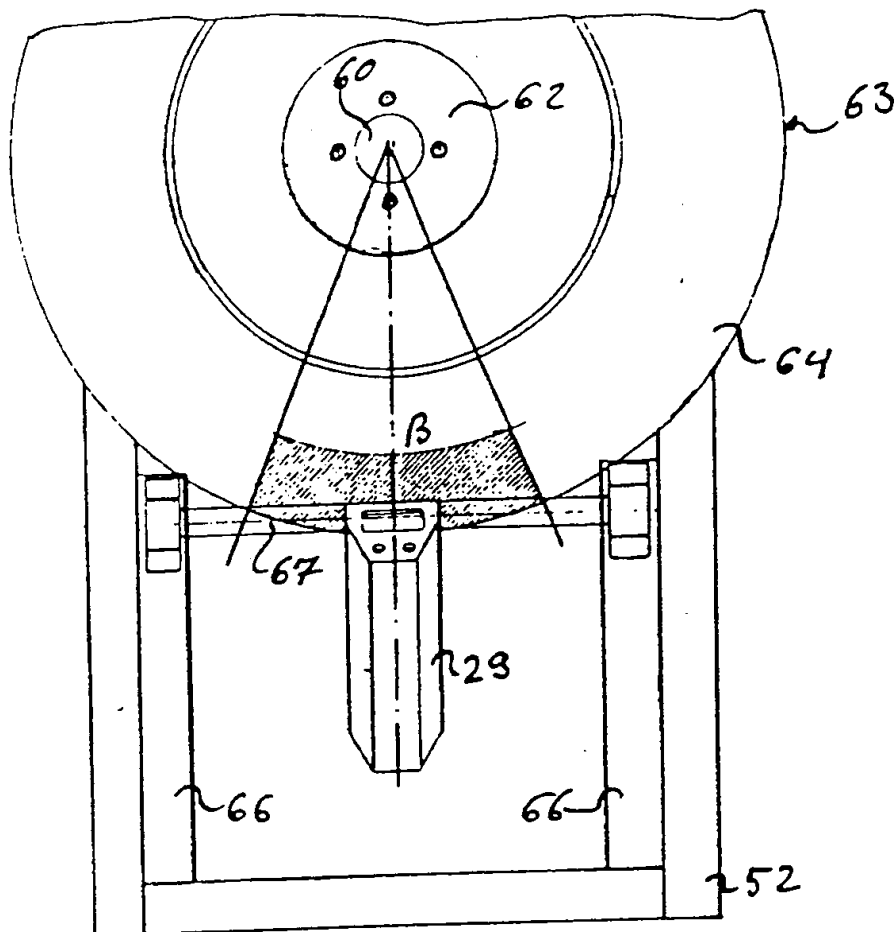
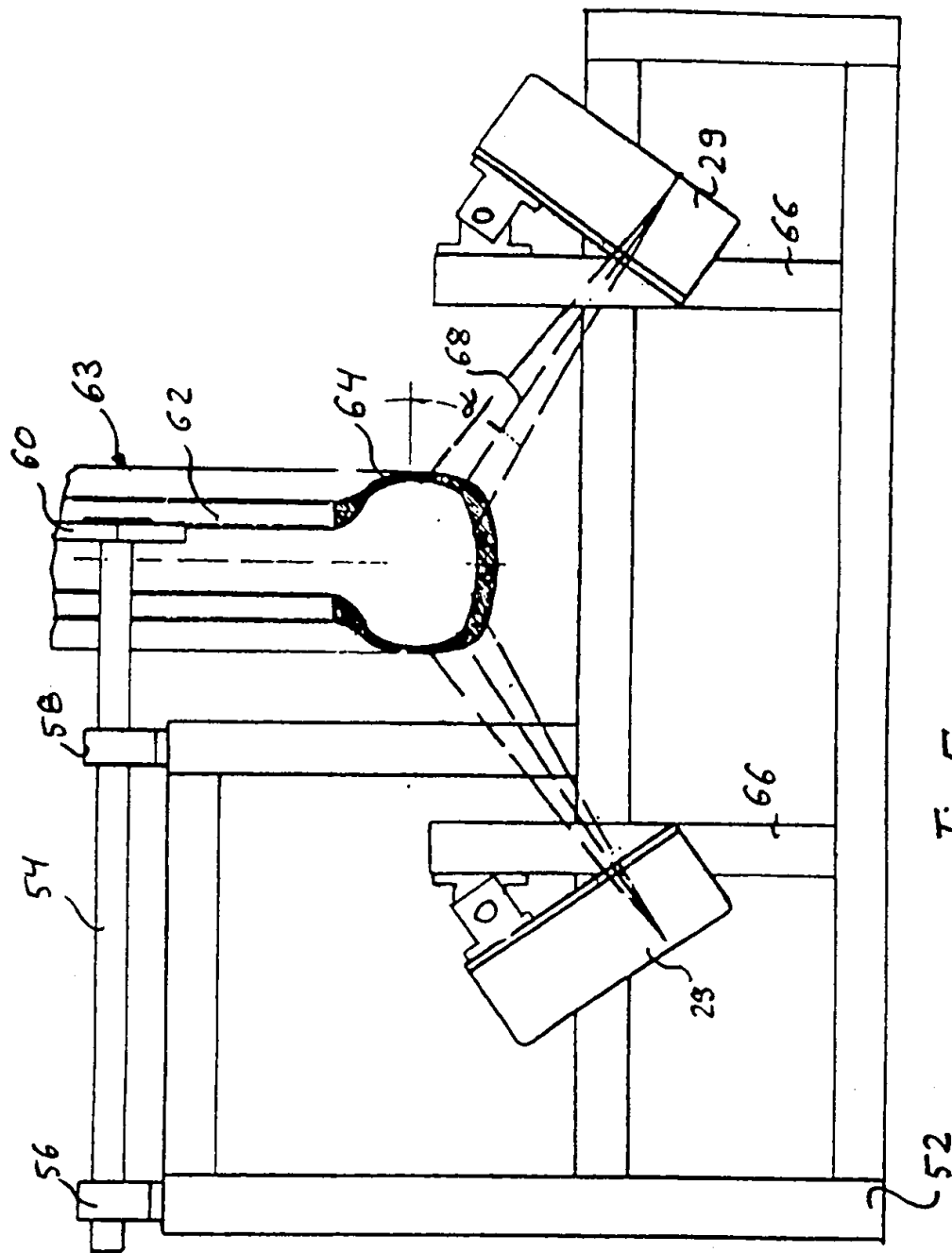


Fig. 4



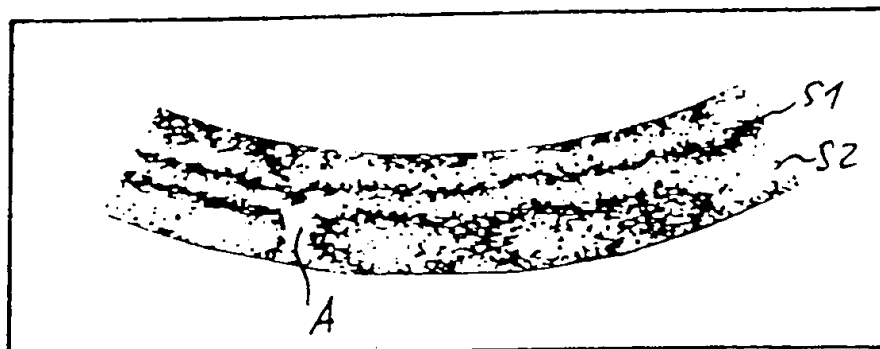


Fig. 6

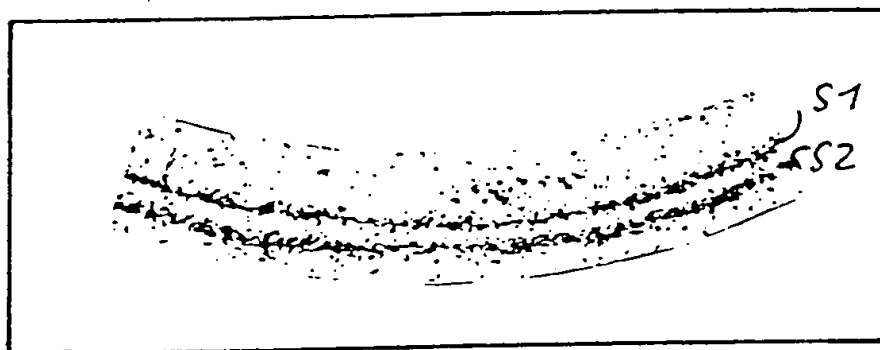


Fig. 7